Construcción de un modelo físico pedagógico para el estudio de la caracterización geométrica de un macizo de Bloques de Roca en Matrices

Ludger O. Suarez-Burgoa* and Heliana M. Restrepo Peña

Departamento de Ingeniería Civil
Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

13 de junio de 2014

Resumen

El presente artículo describe el procedimiento de construcción de un modelo físico pedagógico para estudiar el proceso de caracterización geométrica de un macizo compuesto por bloques de roca (*bims*). El proceso de aprendizaje se inicia con la construcción de ese modelo físico pedagógico, que es desarrollado por los mismos estudiantes. En este documento se detallan todos los aspectos para poder construir este modelo con materiales de fácil adquisición y el uso de algunas herramientas; más no describe el procedimiento de análisis del modelo. Se observó en esta experiencia —obtenida de una asignatura de pre-grado de ingeniería civil— que los estudiantes respondieron de forma favorable a la elaboración del modelo, y esto incentivó para que a partir del modelo puedan aplicar el procedimiento de análisis para la descripción geométrica del *bims*.

palabras clave: modelo físico, pedagogía, bloques en matrices, material geológico.

Abstract

The present article describes the procedure of construction of a pedagogical physical model for the study the geometrical characterization process of a mass composed by rock-blocks in matrices (*bims*). In this document is detailed all the aspects in order to built thi pedagogical physical model, which was performed by the own students. It was observed in this experience —obtained from a pre-grade class in civil engineering— that the students responded propitiously in the model elaboration, and this stimulated to apply the new acquired knowledge for the geometrical description of the *bims*.

keywords: physical model, pedagogy, blocks in matrices, geological material.

1. Introducción

El nombre de *bimrock* fue un acrónimo proveniente del idioma inglés introducido por los científicos de las Ciencias de la Tierra a finales del siglo pasado, para generalizar desde el punto de vista geotécnico todos los materiales compuestos por *Bloques en Matriz de Roca*, *v.gr.* BIMRock: *Blocks*

*Correo electrónico: losuarezb@unal.edu.co.

In Matrix Rock. Posteriormente, se introdujo un conjunto de materiales que eran similares a los anteriores, y se los conoció como *bimsoil*; lo que por deducción serían los *Bloques en Matriz de Suelo*, *v.gr.* BIMSoil: *Blocks In Matrix Soil*. A los dos conjuntos de materiales se los puede llamar entonces *bims*, que serían todos los geomateriales compuestos por *Bloques en Matrices* (*v.gr.* BIMS: *Blocks In MatriceS*) sean matrices de suelo o de roca.

Dentro de estos dos grandes conjuntos de materiales se puede encontrar otros subconjutos de materiales tales como las rocas melágenas, depósitos aluviales, saprolitos, conglomerados, brechas, rocas cataclásticas, regolitos, por ejemplo. Esta clasificación y nombre surgió con el fin de agrupar los distintos materiales de estas características desde el punto de vista geotécnico y de la ingeniería geológica.

En estas disciplinas, es una gran preocupación estudiar estos materiales debido a que al ser estos no-homogéneos para las escalas de las obras civiles, su comportamiento mecánico de resistencia y de deformación varía según: la rigidez y resistencia de los bloques, la rigidez y resistencia de la matriz, la proporción en volumen de bloques respecto al volumen total del macizo, la forma de las partículas, la orientación espacial de las mismas, y su distribución espacial *in situ*.

Por tales motivos, se le da gran atención al estudio de la caracterización geométrica de los *bims*. La caracterización geométrica consiste en obtener de forma cuantitativa: la proporción en volumen de bloques respecto al volumen total del macizo, la forma de las partículas, la orientación espacial de las mismas, y su distribución espacial.

Sin embargo, esta cuantificación debería realizarse en campo, en los afloramientos de esos materiales. Pero, una de las primeras desventajas de hacer la descripción geométrica es que en la mayoría de los casos, estos afloramientos son inestables y pueden presentarse caídas de rocas. La otra desventaja es que el proceso de descripción es un proceso largo que no se termina en una entera jornada de trabajo.

Si llevamos esta necesidad y estos inconvenientes al lado académico, el problema se complica aún más. Por lo normal, en las universidades latinoamericanas los cursos donde se quiere lograr que los estudiantes aprendan a describir geométricamente un macizo de *bims* está compuesto por alrededor de los 40 estudiantes por semestre académico; lo que indica que enseñarles a caracterizar *in situ* sería una labor muy larga, costosa y riesgosa.

Por otro lado, la enseñanza de esta caracterización geométrica en estos macizos, con los medios actuales: clase magistral, uso del tablero, o inclusive el uso de tecnologías de información y de educación avanzadas, no sería suficiente; esto debido a que en definitiva el estudiante tiene que darse su tiempo necesario frente al afloramiento de *bims* para entenderlo y describirlo en la fase de aprendizaje, y muchas veces hasta adquirir confianza y pericia.

Por tales motivos, se ideó una forma de crear un modelo geométrico físico reducido de *bims* (más específicamente, un modelo de *bimrock*) con el fin de estudiar el procedimiento de su caracterización geométrica; con base a las experiencias ganadas por el consultor independiente Edmund Medley [4]; adaptado a los materiales, necesidades, y habilidades de los estudiantes de la asignatura de *Estabilidad de Laderas* del nivel de pre-grado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín.

Luego de esta experiencia, se encontró diferencias importantes del caso primero con el caso local; esto en aspectos tales como la forma de lograr el modelo físico de *bimrock*, los materiales usados, y los resultados encontrados. Asimismo, se observó que la experiencia practicada en la asignatura fue valorada grandemente por los estudiantes, y respondieron de forma eficiente y plácida para lograr el modelo, y de él obtener el aprendizaje que se buscaba.

2. Caracterización geométrica de los *bims*

Toda caracterización de los *bims* es relativa a una escala; es decir, relativa a la *máxima dimensión observable* que por lo normal es una dimensión característica de una obra civil; por ejemplo el diámetro de un túnel, la altura de una banca de talud, el ancho de una vía, el lado mayor de una fundación superficial.

Los dos datos más importantes y mínimos que pueden caracterizar la geometría de los *bims* —para su posterior uso en la caracterización mecánica— es la proporción del volumen de los bloques respecto el volumen total del macizo (C), y el tamaño más probable de los bloques; si se asume que la forma de los bloques es constante en todos los bloques e iguales a una esfera, o cúbica (por ejemplo).

Si no se asume tamaños iguales, es necesario conocer también la distribución de las frecuencias de los tamaños de los bloques en el macizo, o el histograma logarítmico de esta misma variable. Esto dará una caracterización geométrica más detallada. Es más, en algunos casos, se llega al nivel de detalle donde se puede dar la dimensión fractal de los bloques en el macizo.

En la mayoría de los casos, por no decir casi siempre, uno no tiene acceso directo y físico a todos los bloques de rocas de un volumen dado de macizo; que además mantenga *in situ* las orientaciones y cantidades de los bloques (*v.gr.* densidad de bloques). De este modo se pueden tomar datos de las siguientes formas.

1. De los afloramientos o de los cortes de excavación (sondeos superficiales); sin embargo esta tarea resulta ser muchas veces una tarea peligrosa. Si se opta por los afloramientos o cortes, es mejor realizarla a través de métodos de imágenes [2], debido a que una descripción directa resulta de alta peligrosidad para el ingeniero que la describe, al estar en contacto con el macizo, muchas veces inestable.

2. De las diagrafías de sondeos y perforaciones (sondeos lineales). En este caso se pierde los datos de las orientaciones de los bloques, a no se que se haga un televisamiento del hoyo del pozo inmediatamente después de estabilizar el mismo tras la perforación.

3. De un trabajo de descripción de bloques de un material removido. Por ejemplo, en los taludes ya fallados, se puede hacer una caracterización de la bloquimetría del material a través de la descripción de aquellos bloques removidos durante el proceso, y encontrados en superficie.

Si se opta por este método, se pierde total información sobre la relación que pudiera existir entre la bloquimetría y la localización y orientación espacial de los bloques; pero se tendría la ventaja de conocer exactamente la forma de los bloques. Sin embargo, es más útil conocer la relación de localización y orientación de los bloques que solo una idea exacta de las formas, por tanto este método en lo posible tiene que evitarse.

Si se opta por los dos primeros métodos; no se tendría información exacta de la forma de los bloques, pero se tendría intactas las localizaciones y orientaciones espaciales de los mismos. En este ultimo caso, uno puede perfeccionar la técnica haciendo la inferencia de las facciones volumétricas de los bloques a partir de información lineal y de superficie; donde para ello uno recurre a los conocimientos de la disciplina de la *estereología*.

La estereología es una técnica estadística que se aplica para caracterizar la geometría de objetos tridimensionales inmersos en un volumen, a partir de la observación de un dado número de planos de corte o proyecciones hacia planos; estos planos orientados de forma aleatoria en el macizo. Y planos de afloramientos es lo que se encuentra *in situ* en muchas ocasiones.

Una cláusula estereológica de gran importancia para nuestro uso es la equivalencia de la proporción de volúmenes $V_V \equiv C$ con la proporción de áreas A_A, equivalencia invariante a la orientación de la observación. Lo mismo ocurre con la proporción de longitudes de trazos que cortan los bloques L_L, pero ésta puede ser equivalente a V_V si y solo si se plantean una alta cantidad de líneas en varias y distintas orientaciones. También existe proporcionalidad de V_V con la superficie bidimensional S_{V2} o

tridimensional S_{V3} de los bloques en el volumen unitario; o del número de puntos que caen dentro y fuera de los bloques, P_P.

De este modo y aprovechando esta cláusula, el método que se opta para lograr la descripción del macizo de *bims* —desde el punto de vista real y didáctico— es el de describir las características geométricas bidimensionales de cada una de las posibles secciones transversales, que de un volumen dado se pueda obtener; y de ello inferir a través de la estereología los valores tridimensionales.

Para ello será necesario hacer un modelo físico geométrico reducido que contenga partículas de una o varias formas dadas, de diferentes tamaños, y distribuidos en un determinado volumen.

De un modelo de esta naturaleza se tiene que obtener el valor numérico de: el número de bloques; la forma de los bloques; el tamaño de los bloques; la orientación de los bloques; la proporción relativa del volumen de bloques respecto el volumen total; y la distribución del tamaño de los bloques.

3. Logro del modelo físico geométrico

Uno de los aspectos importantes que se tiene que lograr en este proceso de aprendizaje es que el estudiante sepa ¿Para qué se estudia los *bims*? ¿Porqué se necesita la descripción geométrica de los *bims*? y ¿Porqué se construirá el modelo físico?

Para dar respuesta a las primeras dos interrogantes (que además se detalla en este documento tanto en la Sección 1 como en la Sección 2) se presentaron las argumentaciones respectivas en dos clases presenciales con el uso de tablero y diapositivas.

En el momento de querer implementar el modelo físico geométrico en la pedagogía de los estudiantes se visó para que el mismo tenga las siguientes características: que sea pequeño para su transporte y manipulación en el aula de clase; que tenga materiales de fácil obtención y no muy costosos para ser adquiridos por los estudiantes, ya que ellos muchas veces son de bajos recursos económicos; que no demandase mucho tiempo en su elaboración, porque los estudiantes tienen que atender otras materias; y que sea de fácil construcción, *v.gr.* que no se emplee ningún equipo, que se usen pocas herramientas, y que demande de básicas habilidades manuales. Además de eso se tenía que estimular al estudiante para que quiera hacer el modelo; pero a la vez no obligarlo.

A continuación se detallará todos los pasos para lograr el modelo físico geométrico de *bims* con fines pedagógicos.

3.1. Los materiales

En esta sección se describirá de forma detalla los materiales que se usaron para lograr el modelo físico; estos materiales destinados para modelas los bloques y la matriz del *bims*, los colorantes usados para dar un contraste visual a las dos fases, los detalles del encofrado necesario para poder vaciar el modelo, y algunas otras herramientas.

3.1.1. Materiales para los bloques y matriz

Para que se cumplan las características del modelo arriba mencionado, se tiene que pensar en dos posibles materiales para dos fines: un material para representar los bloques y otro para representar la matriz.

Inicialmente se pensó en usar arcilla ya preparada (aquella que se emplea en las artes plásticas) para la creación de las partículas que representarían a los bloques, y usar yeso para representar la matriz.

Sin embargo, se observó dentro de esta nuestra experiencia que no existe una buena adherencia entre la arcilla y el yeso. Las causas de esta posible mala adherencia es la diferencia de los contenidos de humedad y conductividad hidráulica que tienen éstos. Las partículas de arcilla a un contenido de humedad dado tienen un volumen determinado. Cuando la arcilla y el yeso interactúan durante el

secado, el yeso fragua y se seca rápido por la reacción química que se involucra con el agua y por su conductividad hidráulica; mientras que la arcilla, sí pierde humedad pero de forma más lenta, donde involucra una contracción, que hace que la adherencia se pierda.

De este modo se optó por usar yeso estructural para ambos: partículas y matriz, pero diferenciarlos con el uso de un colorante (*e.g.* anilina). El uso del colorante servirá para que las partículas sean reconocibles visualmente en el modelo.

Para crear las partículas que representarán los bloques de roca se necesitó alrededor de 5 kg de yeso estructural en polvo; y tres bolsas de 100 g de anilina en polvo. Se recomienda no usar el yeso que se vende preparado en bolsas que se usa especialmente para darle el acabado final del revoque, debido a que es muy líquido y su tiempo de fraguado es largo cuando se implementa para llenar volúmenes en vez de llenar superficies.

Debido a que el yeso estructural es menos elaborado que uno de revoque, éste primero tiene algunas partículas mucho más duras y gruesas. En lo posible se tiene que tamizar el yeso estructural de tal modo de reducir la proporción de partículas duras y grandes.

Las partículas que representarán los bloques —por tener color y además para poder resistir sin deformarse la presión hidrostática del yeso en estado líquido que representará la matriz— se tienen que crear con antelación de al menos una semana. Esto también evitará que el color de las partículas fluyan en el yeso blanco que representa la matriz. Se ha observado en nuestra experiencia que cuando todavía las partículas están húmedas y se las vacía con el otro yeso se presentó una especie de flujo.

En el proceso de elaboración de las partículas es muy importante garantizar que ellas tengan el mismo volumen si representan una familia de partículas. En un modelo se puede definir varias familias de partículas, que tengan las mismas propiedades geométricas (algo similar a las familias de discontinuidades de los macizos rocosos). Para ello, una idea interesante de un grupo de estudiantes fue el de usar un molde (de esos que se usan para cortar la masa con fines de hacer galletas) por familia, para extraer siempre la misma cantidad de material. A este molde lo llamaremos *molde de corte*.

3.1.2. El colorante

Hay dos tipos de colorantes: la orgánica que se puede comer y sirve para dar color a las cremas de las tortas; y la química que sirve para dar color a las pinturas económicas basadas en agua. Estos colorantes se llaman en el mercado local colombiano *anilina*.

Se recomienda usar únicamente el colorante químico, debido a que se ha observado que el colorante orgánico se descompone con la presencia del agua y las altas temperaturas. La anilina química se puede encontrar en las ferreterías o depósitos para construcción.

El el caso del presente modelo se usaron tres colores: azul, verde y rojo. Entre todos los colores posibles a usar, nuestra experiencia mostró que el amarillo no da buen contraste a las partículas con el yeso que hará las veces de la matriz.

Solucionado el problema de las partículas, el siguiente aspecto a resolver es el del molde. Esto se logró por medio de la fabricación de un encofrado.

3.1.3. El encofrado

El encofrado, también conocido como *formaleta* puede ser de madera, metal o algún tipo de plástico. Si se va a usar madera, las paredes pueden forrarse con chapa metálica para darle una superficie lisa y uniforme.

El encofrado tiene que tener una forma interna igual a la de un paralelepípedo de sección transversal cuadrada. Las sección cuadrada que se usó tuvo dimensiones de $7\,\text{cm} \times 7\,\text{cm}$ de lado; mientras que la altura interna usada para la sección tomada fue de 21 cm. Es necesario lograr una exactitud de las dimensiones internas de la formaleta; a dos milímetros en dimensiones lineales y a 0,05°en dimen-

siones angulares para el caso del paralelismo entre caras opuestas y la perpendicularidad en los lados adyacentes.

El espacio del vaciado, aquel por el cual se verterá las partículas y la mezcla, es la misma sección cuadrada; esto indica que la formaleta es similar a la formaleta de una columna y no de una viga.

Los primeros 7 cm en la base del encofrado (y del modelo al final) se destinará para proveer un largo que se le llamará *largo de agarre*. Este *largo de agarre* sirve mucho para el momento en que el modelo esté totalmente seco y se inicie el cortado en rebanadas transversales (así como se corta un pan tajado). Por tanto, se llenará solo de yeso sin ninguna partícula en todo ese *largo de agarre*; y los restantes 14 cm por encima se destinará de espacio para recibir el yeso con las partículas.

Para evitar que las partículas se asienten más allá del límite del *largo de agarre* se tienen dos posibilidades.

1. Vaciar desde el fondo hasta una altura de 14 cm, colocando el yeso de matriz y las partículas; y luego rellenar los últimos restantes 7 cm solo con yeso de matriz.

2. Vaciar de forma inversa al anterior caso, es decir colocar solo el yeso desde el fondo hasta una altura de 7 cm; y luego colocar una lámina de madera o cartón (para definir la interfase) para luego colocar el yeso y las partículas. En este caso haga un buen acabado de la superficie con una espátula.

Ambas tienen sus ventajas, pero en el primer caso se tiene dos en vez de una ventaja. En el primer caso no se necesita de lámina adicional, y la superficie libre no necesita de terminarse con espátula.

En nuestra experiencia, se plantearon distintas opciones de encofrados, como por ejemplo: papeleros y recipientes plásticos; sin embargo, no se logró obtener paralelepípedos perfectos por las esquinas curvas que tienen estos recipientes comerciales. Esto es una desventaja con respecto a los encofrados preparados para este fin, donde se logra obtener las dimensiones deseadas. Una fotografía de un encofrado metálico construido para este fin se muestra en la Figura 1.

Figura 1: Encofrado metálico para obtener un paralelepípedo perfecto.

3.1.4. Otras herramientas

Para la preparación de las mezclas, se necesita adicionalmente: un recipiente con agua potable de dos litros de capacidad, y otro recipiente más chato para hacer las mezclas. Una superficie plana de metal, de losa u otro material; lo importante en esto es que la superficie sea plana y lisa, no deformable y de un material que no absorba humedad.

3.2. La construcción

A continuación se exponen algunas recomendaciones para la construcción del modelo físico. Estas recomendaciones fueron mejoradas por nuestra experiencia; ganada por los estudiantes del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia, donde se construyeron 11 modelos físicos distintos donde cada grupo de estudiantes debía encontrar su respectiva solución.

3.2.1. Preparación de las partículas

Para la preparación de las partículas, se mezclaron los polvos de yeso y colorante químico en seco. Luego se agregó agua en la proporción en volumen: de una porción de yeso más anilina con media porción de agua.

Tome en cuenta que para la elaboración de las esferas se prepara una mezcla por vez, debido a que el yeso se endurece muy rápido. Primero se hace la mezcla del yeso y la anilina química en seco (*v.gr.* sin suministrarle agua). Luego esta mezcla se humedece con agua, e inmediatamente con las manos se forma la esfera. También puede usar una cubeta para trabajar sobre ella en la elaboración de las partículas (Figura 2(a)).

Tanto el uso del *molde de corte* (cuya justificación se mencionó en la sección de arriba) como el mantener las mismas proporciones en las mezclas, posibilita obtener el mismo volumen de material. El resultado de la construcción de las partículas se muestra en la Figura 2(b).

(a) cubeta metálica con la mezcla

(b) esferas preparadas

Figura 2: Construcción de las esferas de yeso.

Es importante usar guantes y delantal, debido a que el colorante químico mancha la piel y puede tardar varios días en que éste desaparezca.

Un procedimiento interesante que sustituye al anterior y que fue también bien logrado en la presente experiencia fue el usar arcilla seca con aditivo plastificante. Esta porción de arcilla seca se molió y pulverizó previamente. El material se pasó por el tamiz #40. Tanto la arcilla seca como el polvo del colorante se mezclaron en seco, y recién ahí se mezcló con el agua. De esta forma la coloración se logró uniforme y no solo en la superficie sino en volumen.

Los resultados que se obtuvieron con este método fueron buenos. Sin embargo, es necesario añadir la misma proporción de arcilla molida a la mezcla de yeso que se preparará posteriormente para representar el material que hará las veces de la matriz del modelo; para que exista una buena adherencia entre partículas y matriz.

Para la creación de las partículas se tiene que tener en cuenta que todas las partículas de un mismo grupo tienen que ser de la misma dimensión. Ya se comentó que el uso de los moldes de repostería para hacer galletas fue efectivo; en este caso se usó tres moldes de corte de forma hexagonal de diferentes tamaños. Luego de cortar con esos moldes el material preparado anteriormente, se trabajó cada porción para obtener la forma esférica deseada. El volumen se estimó para cada esfera, este volumen relativo al volumen que genera el *molde de corte* calculado por ecuaciones geométricas (Figura 3).

Figura 3: Resultado de las esferas construidas.

Obtenidas las esferas, se verifica —en varias direcciones y con un pie de rey (*v.gr.* micrómetro)— que sus diámetros se estén logrando. Además se verifica que el valor de los diámetros sea coherente con el volumen calculado por el *molde de corte*, y el deseado para cada familia de partículas. Estos valores de volúmenes y diámetros tienen que calcularse de forma previa.

Alcanzado el diámetro de las esferas, usted tiene la libertad de alterar la forma de las mismas a otras formas (y es recomendado para tener variados tipos de modelos). Por ejemplo, puede achatar la esfera para obtener una elipsoide. Puede convertir la elipsoide en un paralelepípedo golpeando la misma sobre una superficie plana. Puede obtener bloques alargados, planos…, es decir la forma que desee. Lo importante es que la forma que se haya decidido sea igual para todas las partículas del mismo color y de la familia.

Una vez se acabe el material destinado para las partículas, ponga todas ellas a secar al aire libre pero no exponerlos al sol; esto debido a que creará fisuras en la superficie de las esferas, e incluso fisuras de grandes proporciones que pueden partir el material. Coloque a secar la esferas por al menos dos días. La experiencia de un grupo de estudiantes fue el de colocar las partículas al horno de microondas; donde se recomiendan secar en varios ciclos (5 ciclos) de 20 segundos cada uno. El resultado fue bueno porque se le había añadido arcilla en la mezcla. Se desconoce el efecto que pueda tener este procedimiento cuando no se use arcilla en la mezcla.

Cuando sequen las partículas, su coloración será más clara y más notoria.

Repita los anteriores procedimientos para distintos colores y diámetros de esferas. Por ejemplo, color azul para esferas de 2 cm de diámetro, color verde para esferas de 1 cm de diámetro, color rojo para esferas de 0,5 cm.

Tres días después de haber hecho las partículas, ellas tendrían que estar secas.

3.2.2. El vaciado con matriz y partículas

Ahora prepare el encofrado (*v.gr.* formaleta) donde se vaciarán las partículas y el material que representará la matriz. Las caras internas del encofrado se untan con una buen cantidad de vaselina para posibilitar una superficie lisa y para poder extraer el bloque ya fraguado sin complicaciones. No escatime en la vaselina.

Prepare el material que representará esta vez la matriz. Esto se logra en las similares proporciones de yeso y agua que se empleó para el caso de las partículas; sin embargo, puede añadir un poco de agua para dar una consistencia esta vez más líquida que plástica.

Desordene todas las partículas (ya secas de hace varios días) de forma que se cree una combinación aleatoria. En la cubeta metálica prepare la mezcla que hará de matriz, y cuando ya esté liso vaya colocando una capa de material de matriz y una porción de partículas. Golpee el molde tres veces cada vez que vierta el material, con el fin de que esta cubra los espacios vacíos entre las partículas. Siga el procedimiento hasta completar el molde.

Cuando se llene completamente el molde utilice la espátula para lograr una superficie lisa en la parte superior del mismo, y también para sacar el material que esté sobrando. Con un trapo húmedo limpie las superficies exteriores del molde para que este quede limpio.

3.2.3. El fraguado y secado

Terminado el proceso de vaciado, deje el molde reposar por un día o máximo dos días hasta que encuentre evidencias de un buen fraguado; luego saque el encofrado con el fin de que sea luego el medio ambiente el que termine de secar el volumen entero de forma gradual.

Deje reposado el bloque del modelo en la sombra por 2 días o más; y luego expóngalo por un mes al sol, pero no a un ambiente húmedo. Al final se obtiene un resultado como el que se muestra en la Figura 4.

Figura 4: Modelo terminado y secado, adentro están las partículas.

Tome en cuenta que por la dimensiones del modelo, este tarda en secar.Nuestras experiencias con moldes de mayores dimensiones no fueron buenas, es decir no es recomendable hacer modelos de dimensiones cuyos lados sean mayores a 15 cm. Se observó en modelos grandes que en las superficies el yeso seca, pero en el interior él se mantiene muy liquido. En el momento de desencofrar la formaleta el material central aún líquido deshace la integridad del modelo.

3.3. Informe de la construcción

En todo experimento es recomendable registrar hasta el mínimo detalle; y cada vez que realice esta experiencia siempre habrá algo nuevo. Reporte por ejemplo las cantidades de los materiales usados y las marcas de los productos usados.

Las variables mínimas que se necesitan informar son: el color, que es distinto para cada familia de partículas; la forma final de cada familia a la que se transformó la esfera inicial; el diámetro esférico equivalente promedio de cada familia ($\bar{d}_{\mathrm{se}}$); y la cantidad de partículas por familia (n_i).

Las variables que se calculan a partir de las anteriores variables son: el volumen unitario promedio de las partículas de cada familia, *v.gr.* cada color, ($V_{\mathrm{u}i}$); y el volumen total por familia, *v.gr.* la multiplicación de las cantidades con los volúmenes unitarios, ($V_{\mathrm{t}i}$). El volumen $V_{\mathrm{u}i}$ se calcula con la ecuación de una esfera

$$V_{\mathrm{u}i} = \frac{1}{6}\pi \bar{d}_{\mathrm{se}}^{3}. \tag{1}$$

En los Cuadros 1 y 2 se muestra —de dos grupos de estudiantes— los informes de las dimensiones y cantidades de las partículas que se usaron en los modelos físicos.

Cuadro 1: Registro de las dimensiones y cantidades de las partículas en el modelo de los estudiantes [5].

Color (familia)	Tamaño	Forma final	$\bar{d}_{\mathrm{se}}$ en cm	n_i	$V_{\mathrm{u}i}$ en cm^3	$V_{\mathrm{t}i}$ en cm^3
Gris (arcilla)	grande	esférica	2,00	40	4,19	167,6
Rojo	mediano	esférica	1,46	50	1,63	81,5
Verde	pequeño	esférica	0,82	100	0,29	28,9

Notas: $\bar{d}_{\mathrm{se}}$: diámetro esférico equivalente promedio de cada familia; n_i: cantidad de partículas por familia; $V_{\mathrm{u}i}$: volumen unitario; $V_{\mathrm{t}i}$: volumen total.

Cuadro 2: Registro de las dimensiones y cantidades de las partículas en el modelo de los estudiantes [1].

Color (familia)	Tamaño	Forma final	$\bar{d}_{\mathrm{se}}$ en cm	Cantidad n_i	$V_{\mathrm{u}i}$ en cm^3	$V_{\mathrm{t}i}$ en cm^3
Verde	grande	elipsoide	1,6	20	4,25	85,0
Rojo	mediano	elipsoide	1,1	30	1,42	42,6
Amarillo	pequeño	esférica	0,8	90	0,47	42,3

Notas: $\bar{d}_{\mathrm{se}}$: diámetro esférico equivalente promedio de cada familia; n_i: cantidad de partículas por familia; $V_{\mathrm{u}i}$: volumen unitario; $V_{\mathrm{t}i}$: volumen total.

El volumen total de las partículas (V_{tp}) es

$$V_{\mathrm{tp}} = \sum_{i=1}^{N} n_i V_{\mathrm{u}i} = \sum_{i=1}^{N} V_{\mathrm{t}i}; \tag{2}$$

donde N es el número de familias de partículas (*e.g.* para los dos ejemplo $N = 3$). Este V_{tp} también se puede calcular a partir de la suma de la última columna de los cuadros 1 y 2.

También es necesario informar sobre el volumen total del modelo (V_{m}). Esto se logra a partir de las dimensiones del molde, si es que el volumen que genera la formaleta es de forma regular (*e.g.* un prisma, donde el volumen es la productoria de sus tres dimensiones), o a partir de técnicas de cálculo tales como el *método de sumersión* en agua u otro fluido.

Con los datos medidos y calculados, finalmente se obtiene la proporción de partículas respecto del volumen del material ($p_{p:m}$); que representa la proporción de bloques en el bims (C)

$$p_{p:m} = \frac{V_{\text{tp}}}{V_{\text{m}}} \equiv C. \tag{3}$$

Para el caso de los dos ejemplos de los cuadros 1 y 2 se tienen los siguientes valores de V_{tp}, V_{m} y $p_{p:m}$ (Cuadro 3).

Cuadro 3: Volúmenes de partículas y volúmenes totales de los modelos físicos.

Modelo	V_{tp}	V_{m}	$p_{p:m}$
[5]	277,9	1500,0	0,185
[1]	169,9	1240,3	0,137

Notas: V_{tp}: volumen total de las partículas; V_{m}: volumen total del modelo; $p_{p:m}$: proporción de partículas respecto del volumen del material.

Además de registrar cuántas partículas y de qué dimensiones se han colocando al modelo, es necesario en esta práctica pedagógica que los estudiantes informen sobre su experiencia en forma de un *informe científico*. Por tanto, en esta experiencia se solicitó a los estudiante que presenten un informe con la experiencia obtenida; en él tenían que escribir sobre: la cantidad de materiales usados, los procedimientos usados, los tiempos implementados, las dificultades encontradas durante el proceso y las soluciones encontradas a esos problemas. Se les pidió que adjuntasen figuras y fotografías; y lo más importante que planteasen recomendaciones y deduzcan conclusiones.

4. La implementación pedagógica de la construcción

En la presente experiencia, los estudiantes que realizaron el modelo lo hicieron en grupos de hasta tres personas; aunque no se exigió que sea hecho por grupos. Hubo dos estudiantes que lograron buenos modelos de forma individual.

Para la realización del modelo se les dio un plazo de un mes con el fin de que se realizara de forma correcta y se secara completamente.

Se dio la libertad de trabajar con cualquier tipo de material, y no importaba las dimensiones pese a que se expuso las dimensiones recomendables del modelo, lo único que se exigió para el trabajo fue que debía haber tres tipos de familias de partículas con diferentes dimensiones y colores, y no se especificó el diámetro de cada una. La Figura 5 muestra un grupo de modelos propuestos por los estudiantes.

4.1. El grupo de estudiantes

Los estudiantes fueron de pre-grado y en su mayoría de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (solo un estudiante era de la carrera de Ingeniería Geológica), que cursaban en el rango del séptimo y octavo semestre del periodo segundo del año 2013. El curso estuvo compuesto por 42 estudiantes, de ellos 18 del sexo masculino (43 %) y

Figura 5: Cuatro modelos distintos presentados por el grupo de estudiantes.

24 del sexo femenino (57 %). Sin embargo, no todos los estudiantes hicieron el modelo; de ellos se abstuvieron de hacerlo 17 (el 40 %).

4.2. El incentivo

Para la realización del modelo, el incentivo radicó en puntos sobre la nota del segundo parcial (éste calificado hasta un máximo de 5 puntos); el método de calificación se realizó de la siguiente manera y bajos las siguientes reglas:

- los que hicieron el modelo físico (sean cuales fueren los resultados de éxito o fracaso) recibieron un punto adicional a su nota del segundo parcial;
- la nota no era transferible a otras pruebas; y
- sólo se permitió elevar la nota hasta un máximo de cinco puntos, que es la nota máxima de ese parcial.

Además se les indicó que se revisaría cada modelo y el informe de las experiencias ganadas y la metodología realizada por los estudiantes con el fin de elegir el mejor modelo.

El modelo elegido como el mejor, recibiría un incentivo adicional de 0,5 puntos más para la nota del tercer parcial. Asimismo, los dos mejores modelos se elegirían como modelos para analizarlos de forma detallada en clase. Estos deberían pasar por un proceso de cortado con un sierra circular de rocas, para obtener *secciones en tajada*, y de allí seguir con el proceso de análisis.

Los criterios para la elección de los mejores modelos fueron los siguientes.

1. La calidad del informe desde el puno de vista de su estructura, es decir: que tenga resumen, introducción, motivación, materiales, procedimiento, discusión, conclusiones y referencias.

2. La terminación del modelo: la obtención de un volumen regular y de dimensiones simétricas (como ser un paralelepípedo), calidad del acabado de las superficies externas, el estado de humedad en el momento de la entrega, la homogeneidad de las partículas, y los métodos utilizados para la construcción.

3. El contenido de humedad del modelo, donde el óptimo era en estado seco.

4. El estado de conservación y compacidad del modelo a largo plazo, debido a que algunos modelos a largo plazo se quebraron por la presencia de granos que se dilataron.

4.3. Los resultados y experiencias

Las experiencias de los estudiantes fueron base para la realización de nuevos modelos, evitar errores y obtener mejores resultados. Por ejemplo, con estas experiencias se logró desarrollar el presente texto.

Algunos estudiantes manifestaron sus experiencias no sólo con la realización del modelo sino como experiencia personal.

Un estudiante comento a cerca de la experiencia [3]:

`...fue interesante aprender cómo puede estar conformado un suelo por medio de este modelo, al ser didáctico sé que no se me olvidara en mi vida, además de esto, me unió a mi familia ya que mi hermanita menor fue la que me ayudó a realizar las esferas, fue un trabajo en equipo que me hizo sentir muy feliz.`

El mismo estudiante había escrito al correo electrónico del profesor:

`Profe también anexo esta imagen para mostrar que el trabajo puede unir la familia y aprender todos en el hogar de como es un macizo rocoso, también le explique a mi mamá pero no tome fotos, pero le pareció muy interesante la propuesta del modelo que es muy didáctico para personas que no conocen del tema.`

Otro estudiante manifestó:

`...fue un trabajo realizado con agrado, no pensé en el incentivo que iba a recibir, simplemente lo hice porque yo quería, me parecía divertido y algo diferente a lo que uno siempre se hace, es una buena técnica para aprender nuevas cosas.`

5. Conclusiones

Se mostró los detalles y pormenores de la construcción de un modelo físico pedagógico para el estudio del proceso de caracterización de un *bims*. Se describió la importancia de la implementación de éste en la pedagogía, y la facilidad con la que se puede lograr el modelo con materiales de fácil adquisición y técnicas sencillas.

Por medio de este modelo físico, los estudiantes pueden acercarse más a la experiencia que tienen los investigadores a la hora de estudiar y realizar modelos que representan un comportamiento de la vida real; es una forma de entender explicaciones científicas de las Ciencias de la Tierra de forma divertida pero productiva.

El empleo de modelos hace que un problema tan complejo como modelar los *bims* se puede llegar a una generalización suficiente para desarrollar ecuaciones y parámetros que los modelen.

Con el modelo físico del macizo de *bims*, se puede estudiar la geometría de un material complejo de ser descrito en aula o en casa, sin temer que necesariamente ir en inicio a trabajos de campo; hasta que se logre un buen entendimiento y pericia. Esta parte de la bondad del modelo físico aquí descrito se explica en un artículo consecutivo a éste.

Referencias

[1] J.M. García García and J. Hidalgo Ospina. Modelo físico bimsoil. Informe de trabajo de curso: estabilidad de laderas, Prof. Ludger Suarez-Burgoa, Dec 2013.

[2] W. j. Xu, Z. q. Yue, and R. l. Hu. Study on the mesostructure and mesomechanical characterisitics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45:749–762, 2008.

[3] J.D. López Hernández, J.E. Giraldo, and J.D. Martínez. Modelo físico para la creación de un macizo de bimsoil. Informe de trabajo de curso: estabilidad de laderas, Prof. Ludger Suarez-Burgoa, Dec 2013.

[4] E. Medley. Notes for an introduction to bimrocks: Kitchen and garage experiments. `http://bimrocks.com/bimsite/wp-content/uploads/2010/07/bimrocks-intro-PDF-Notes-Format.pdf`, Jun 2014. Presentation with notes.

[5] H. Restrepo and L.D. Jiménez Osorio. Modelo físico de bimsoil. Informe de trabajo de curso: estabilidad de laderas, Prof. Ludger Suarez-Burgoa, Dec 2013.